

EL DIODO VARACTOR

Su empleo como multiplicador de frecuencias

Por FERNANDO SAEZ VACAS

Alumno de quinto curso. E. T. S. I. T.

Introducción [1]. [2].

En la actualidad es unánime la tendencia a la transistorización de los equipos con objeto de hacerlos más compactos, más seguros y también más baratos de mantenimiento. Durante unos años no ha sido posible obtener potencia utilizable en microondas con estos elementos.

La moderna tecnología ha ido produciendo progresivamente transistores de mayor frecuencia, máxima de oscilación, pero a medida que se aumenta ésta, disminuye la potencia, y, además, resulta muy delicada la estabilización de los osciladores transistorizados a tales frecuencias.

Otro método consiste en partir de un oscilador-amplificador de elevada potencia y frecuencia relativamente baja, pero muy estabilizada (por ejemplo, con un cristal de cuarzo), y multiplicar dicha frecuencia por medio de un elemento no lineal, como el varactor. El varactor es un elemento que se utiliza en la amplificación con muy bajo ruido, en la multiplicación de frecuencias, en el control automático de frecuencia, en la modulación de frecuencia, en la realización de filtros variables con control de tensión, etcétera.

El presente trabajo se limita a analizar el varactor en función de su capacidad para generar armónicos.

En primer lugar, se define el elemento como una unión p-n de material semiconductor. Se demuestra que su rendimiento teórico en la conversión de frecuencias es la unidad.

Demostrada así su utilidad, parece conveniente profundizar un poco en su comportamiento físico interno. Se particulariza para dos uniones de distinta formación: unión abrupta y unión graduada linealmente, y se obtienen en cada caso las expresiones fundamentales que relacionan capacidad y tensión aplicada.

Viene después el circuito equivalente y la consideración ponderada de cada magnitud que en él aparece.

Es particularmente importante el apartado siguiente, en que se destacan las características eléctricas determinantes: factores de mérito, frecuencia de corte, factor de forma y la tensión de ava-

lancha, que definen la potencia, frecuencia y rendimiento posibles.

A continuación de unos circuitos multiplicadores básicos (no los únicos) vienen las características de compromiso potencia-frecuencia, tipos de diodos y límites de los varactores. Un gráfico expresa muy claramente el estado actual de estos elementos en la relación potencia-frecuencia a partir de un vatio.

Por último, se señalan algunos inconvenientes en la realización de circuitos multiplicadores.

El diodo varactor y la generación de armónicos [2]. [3]. [4].

La palabra varactor, contracción de las inglesas *VAR*iable *reACT*OR, no define realmente más que a una reactancia variable. Cuando esta reactancia es una capacitancia se suele denominar varicap (*VAR*iable *CAP*acitor).

Esta capacidad variable se realiza con una unión p-n de material semiconductor. Recibe el nombre de diodo varactor, a menudo simplemente varactor, nombre que ha prevalecido sobre el de varicap. El diodo varactor es, pues, un elemento capacitativo cuya capacidad varía con la tensión según una dependencia no lineal.

Precisamente esta dependencia con la tensión eléctrica aplicada en sus extremos, unida a la no linealidad del dispositivo y a las pocas pérdidas inherentes a toda reactancia pura, señalan al varactor como un generador de armónicos de alta eficiencia.

Cuando se aplica a un varactor una señal alterna tiene lugar en el circuito formado por el dispositivo un efecto muy complejo. La alteración del valor de la señal hace variar la reactancia del circuito y cambia, además, el grado de energía que la capacitancia del diodo absorbe y luego devuelve al circuito. Resulta complicado explicar este comportamiento de una forma matemática, pero sabemos que el resultado es que se produce una onda de salida de alta distorsión, de gran riqueza de armónicos. Para multiplicar la frecuencia de entrada sólo hay que disponer de unos filtros adecuados, que seleccionen el armónico deseado.

Eficiencia de la conversión según las relaciones Manley-Rowe [5]. [6]. [7].

La eficiencia es siempre la unidad (100 por 100), según expresa la siguiente ecuación, deducida de las de Manley-Rowe, cuando se supone a la salida solamente un filtro sintonizado al armónico n -simo de la señal

$$\frac{P_o}{f} + \frac{nP_n}{nf} = 0 \quad \frac{P_n}{P_o} = -1$$

En dicha ecuación, P_o (potencia entregada por la señal) es positiva y P_n (potencia recibida a la salida) es negativa.

Naturalmente este rendimiento es puramente teórico. Manley y Rowe llegaron a estas fórmulas partiendo de unas condiciones especiales: supusieron que el elemento reactivo era no lineal (de cualquier forma) y que su característica era única (en el caso del diodo varactor, a cada tensión corresponde una capacidad y sólo una). Por si fuera poco, en dicho análisis los filtros son perfectos y dejan paso a una sola frecuencia, rechazando a todas las demás.

En la práctica siempre hay frecuencias indeseables: los filtros no son perfectos, hay pérdidas en los circuitos, los diodos presentan con frecuencia histéresis y, lo que es más importante, nunca son una reactancia pura. Debido a estas causas la eficiencia es bastante menor que la unidad, y, entre otras cosas, no será independiente del orden de multiplicación. Sin embargo el rendimiento es todavía tan considerable que este elemento se va imponiendo día a día en los circuitos de generación de frecuencias, incluso en el dominio de las microondas.

Comportamiento físico interno del diodo. Deducción de la fórmula capacidad-tensión. [4]. [7]. [8]. [9]. [10].

La unión de dos materiales p y n de un mismo cristal presenta, en estado de equilibrio y debido a las diferentes funciones-trabajo, una barrera de potencial o escalón de tensión que tiende a desplazar los electrones y los huecos en sentidos contrarios. Donadores y aceptadores quedan ligados a la malla cristalina (Fig. 1).

La región de transición tiene tendencia a quedar libre de cargas móviles, por lo cual se denomina zona de agotamiento o de bloqueo de carga espacial (depletion layer, couche d'arrêt, Sperrschicht). Esta zona, que actúa como un verdadero dieléctrico, disminuye con la aplicación de tensión en sentido directo y aumenta cuando se aplica en el sentido favorable a la ddp de contacto. En cualquiera de los casos hay un efecto de capacidad que depende de la anchura de la zona de bloqueo y, por tanto, de la tensión.

En el primer caso (polarización en sentido directo) la capacidad es relativamente grande y el efecto predominante es el de paso de corriente elevada por la unión (Fig. 2).

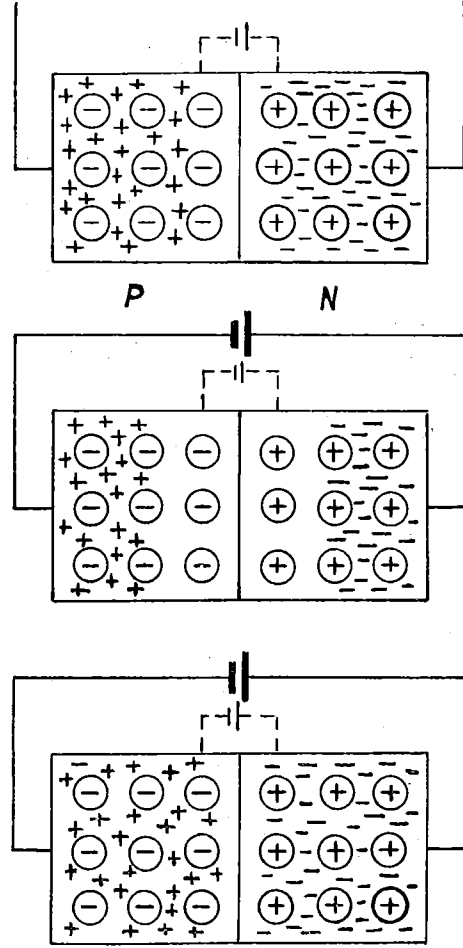


Fig. 1

En el caso de tensión inversa existe una pequeñísima corriente asociada con los pares electrón-hueco, generados térmicamente. El número de pares es independiente de la tensión de polarización, por lo que la corriente tiende a saturarse a un valor constante. Aquí, el efecto más importante es la presencia de una capacidad pequeña, totalmente controlable por la tensión aplicada, cuya característica es única, y, como veremos, variable de una forma no lineal. Todos los

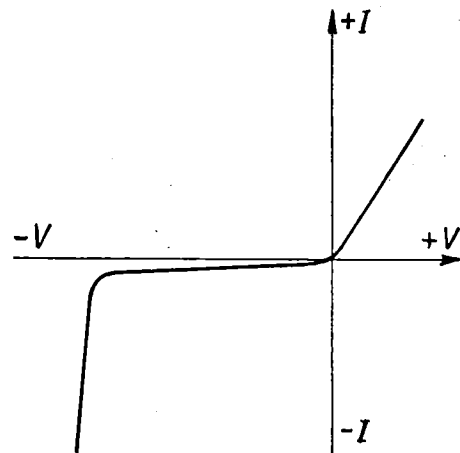


Fig. 2

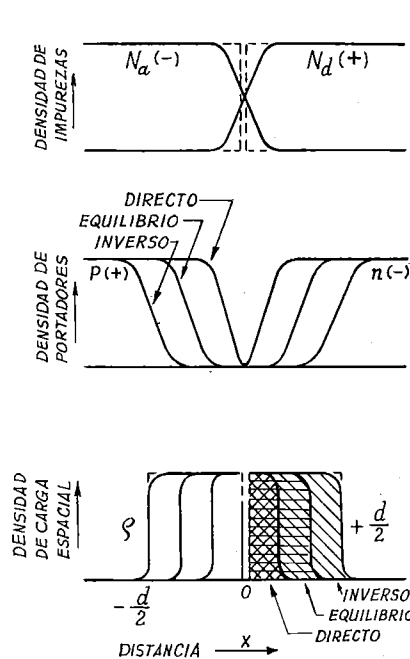


Fig. 3

diodos presentan estas características en mayor o menor grado, pero se pueden acentuar y así se hace en el caso de los diodos varactores, utilizando distintas técnicas de distribución de impurezas.

Para el estudio teórico del problema y deducción de la expresión que relaciona la capacidad con la tensión de control, supondremos que el cristal es homogéneo y que no varían las condiciones más que en la dimensión longitudinal. Fuera de esta zona de transición habrá neutralidad de carga.

a) Unión abrupta (Fig. 3).

Se considerará el caso de distribución simétrica de impurezas, aunque en la práctica, debido a problemas tecnológicos, suele estar una parte más «drogada» que la otra.

Con esta suposición de principio:

$$N_d = N_a = N_i \quad \text{densidad de impurezas por unidad de longitud.}$$

La ecuación de Poisson, que relaciona el potencial con la densidad de carga espacial en cada punto, nos da:

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = - \frac{N_i \cdot q}{\epsilon}$$

ya que, en virtud de la forma de la distribución,

$$\rho = N_i \cdot q$$

donde φ es el potencial en el punto, q la carga elemental, ρ la densidad de carga espacial por unidad de longitud y ϵ la cte dieléctrica.

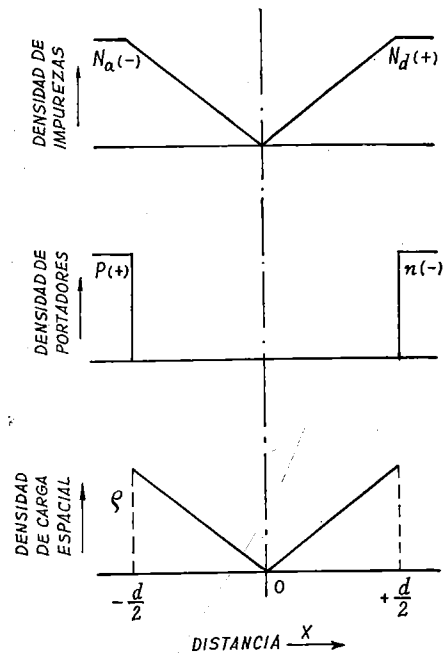


Fig. 4

Integrando sucesivamente entre $-d/2$ y $+d/2$:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \varphi}{dx^2} &= -q \frac{N_i \cdot x}{\epsilon} + q \frac{N_i \cdot d}{2\epsilon} \\ \varphi &= -q \frac{N_i \cdot x^2}{2\epsilon} + q \frac{N_i \cdot d \cdot x}{2\epsilon} \end{aligned}$$

Si llamamos V a la diferencia de potencial total, $V = V_p + V_\varphi$, siendo V_φ el potencial de contacto y V_p la tensión de polarización aplicada en el sentido inverso

$$V = \varphi \Big|_{-\frac{d}{2}} - \varphi \Big|_{+\frac{d}{2}} = - \frac{q N_i \cdot d^2}{2\epsilon};$$

$$d = \left[\frac{2\epsilon (-V)}{q \cdot N_i} \right]^{1/2}$$

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^{d/2} q \cdot N_i \cdot dx = \frac{N_i \cdot q \cdot d}{2} = \\ &= \frac{N_i \cdot q}{2} \left[\frac{2\epsilon (-V)}{q \cdot N_i} \right]^{1/2}; \quad C = \frac{dQ}{d(-V)} = \\ &= \frac{\epsilon}{2} \left[\frac{2\epsilon (-V)}{N_i \cdot q} \right]^{-1/2} = K_1 \cdot (-V)^{-1/2} \end{aligned}$$

expresión que define la dependencia de la capacidad del diodo con la raíz cuadrada del inverso de la tensión negativa aplicada para este tipo de unión. Capacidad por unidad de área.

b) Unión graduada linealmente (Fig. 4).

La distribución de impurezas depende ahora de la dimensión longitudinal x , según una recta de pendiente que llamaremos m . Los cálculos son totalmente similares al caso anterior.

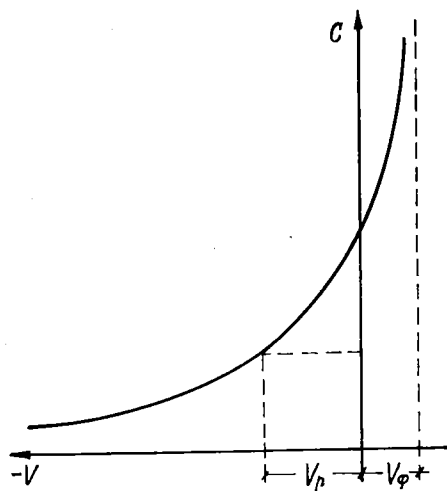


Fig. 5

$$N_d - N_a = m \cdot x \quad ; \quad \rho = q \cdot m \cdot x$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{qm}{\epsilon} \quad ; \quad \frac{d\varphi}{dx} = \frac{q \cdot m \cdot d^2}{8\epsilon}$$

$$-\frac{q \cdot m \cdot x^2}{2\epsilon} \quad ; \quad \varphi = \frac{q \cdot m \cdot d^2 \cdot x}{8\epsilon} - \frac{q \cdot m x^3}{6\epsilon} \quad ;$$

$$V = \varphi \Big|_{-\frac{d}{2}}^{-\frac{d}{2}} - \varphi \Big|_{+\frac{d}{2}} = -\frac{qmd^3}{12\epsilon} \quad ;$$

$$d = \left[\frac{12\epsilon (-V)}{q \cdot m} \right]^{1/3} \quad ; \quad Q = \frac{qm}{8} \left[\frac{12\epsilon (-V)}{q \cdot m} \right]^{2/3}$$

$$C = \frac{dQ}{d(-V)} = \epsilon \left[\frac{12\epsilon (-V)}{q \cdot m} \right]^{-1/3} = K_2 (-V)^{-1/3}$$

La técnica de formación y el material utilizado en el semiconductor definen no sólo la característica de variación con el voltaje, sino también los márgenes de capacidad. Los diodos para muy alta frecuencia (capacidades pequeñas) exigen una técnica distinta que los de frecuencias bajas o medias. Para muy alta frecuencia se prefieren materiales de alta movilidad, como antimonio de indio.

El exponente de $(-V)$ depende de la repartición de impurezas. Se puede escribir la ley general:

$$C_d(V) = K \cdot (-V)^{-\gamma}$$

Las figuras 5 y 6 representan la característica del elemento y algunos de los símbolos con que se suele designar en los esquemas de circuitos.

Circuito equivalente [1]. [2]. [4]. [10]. [11].

En la figura 7a, $C_d(-V)$ es la capacidad, variable con la tensión inversa; R_d la resistencia en paralelo, debida a la corriente inversa, muy

pequeña, de que se habló al principio. Normalmente tiene un valor muy elevado y su influencia es despreciable. La resistencia serie R_s se debe a la estructura del material semiconductor. Es la resistencia de «fabricación», por así decirlo. Su efecto es indeseable porque introduce pérdidas. Se desea siempre que sea lo más pequeña posible, con lo cual se acerca más el diodo a la condición ideal de reactancia no lineal pura y la eficacia de conversión es mayor. L_s comprende los efectos de inductancia de las conexiones eléctricas. Podría

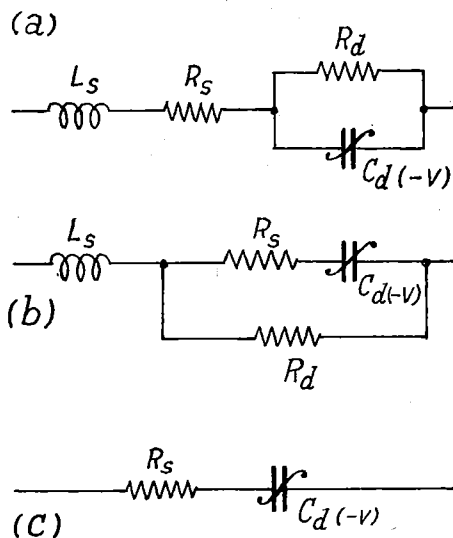


Fig. 7

incluirse también la capacidad en paralelo, correspondiente a la cápsula que encierra al diodo para protegerlo.

También se podría utilizar el circuito de la figura 7b.

En la práctica quedan todos ellos reducidos al más sencillo de la figura 7c.

Características eléctricas determinantes del comportamiento del diodo varactor [1]. [2]. [4]. [10]. [11]. [12].

Son Q (factor de mérito), f_c (frecuencia de corte), γ (exponente o factor de forma) y $-V_r$ (tensión de ruptura o avalancha).

El diodo perfecto sería aquel que tuviera un Q infinito (R_s nula). Tenemos, para una tensión de polarización cualquiera,

$$Q = \frac{1}{\omega \cdot C_d \cdot R_s}$$

donde C_d y R_s son los valores correspondientes a esa tensión y a una pulsación cualquiera ω . Las curvas de la figura 8, correspondientes a un varactor de potencia Motorola MV705, representan la variación de Q y R_s con la tensión aplicada. Obsérvese que, para mayor comodidad, se

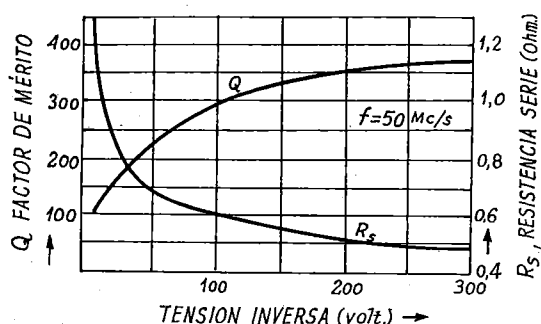


Fig. 8

utiliza la parte derecha del eje de abscisas en la representación de los voltajes inversos.

Una magnitud muy interesante es la llamada frecuencia de corte del diodo, que viene definida en el caso de circuito práctico de la figura 7c, por R_s y C_d , de la forma siguiente:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_s \cdot C_d}$$

Es aquella frecuencia para la cual la tensión de pérdidas es igual a la de aprovechamiento. Indica una limitación del diodo para las frecuencias de entrada. Siempre se debe trabajar con señales de frecuencia mucho menores que f_c .

γ expresa la no-linealidad del elemento y, por tanto, su capacidad para producir armónicos en mayor o menor número. Parece que, en los diodos realizados hasta la actualidad, γ oscila entre 1 y 1/9, dependiendo de los diferentes perfiles de difusión de las impurezas en el cristal. Se estima que los valores más convenientes para la conversión de frecuencias son aquellos comprendidos entre 1/3 y 1/2. De algún modo también depende la potencia de salida de este factor de forma.

La tensión de ruptura es de primordial importancia en la consideración de la potencia permisible en el diodo. En efecto, de la expresión

$$P_{media} = \frac{\delta \cdot \omega_1 \cdot C_{dm}}{4} (-V_r)^2$$

presentada por Leenon y Rood en un trabajo titulado «Large power harmonic generation with a silicon varactor diode», en el *Electron Devices Meeting* de 1959 (Washington), se deduce con toda claridad que la potencia media es directamente proporcional a las siguientes magnitudes:

- δ , cantidad que viene determinada por la no-linealidad de la capacidad y por el armónico deseado (generalmente, $\delta < 1$). Debe existir alguna relación entre δ y γ , pero no la conozco, ya que no he podido encontrar el original aludido.
- ω_1 , pulsación o frecuencia de entrada.
- C_{dm} , valor medio de la capacidad en todo el margen de utilización.
- V_r , tensión de ruptura o avalancha.

Hay un compromiso entre potencia y frecuencia. A mayor potencia, menor frecuencia, y vi-

ceversa. Las frecuencias muy altas requieren capacidades pequeñas y, por otra parte, cuanto más elevada la capacidad, se obtiene mayor potencia. En resumen, como también entran en juego las demás características del semiconductor, el rendimiento dependerá, en definitiva, de la tecnología del mismo. En el mercado existen varactores de pequeña potencia, con capacidades desde 0,1 pF y frecuencias hasta varios centenares de gigaciclos. En el otro extremo se llega alrededor de los 50 vatios, con capacidades muy superiores.

Como ilustración se transcriben algunos valores del varactor de potencia motorola MV705, que venimos utilizando para fijar ideas:

Punto de polarización: $-V = 6$ voltios; $f = 50$ Mc/s.

$-V_r = 150$ v. $I_r = 10 \mu A$. ($R_d = 15 M$)

$R_s = 2$ ohmios. $C_d = 50$ pF. $Q = 40$.

Eficiencia como generador de armónicos: $\eta = 40\%$

$f_e = 50$ Mc/s. $f_s = 200$ Mc/s; $P_e = 50$ wat.

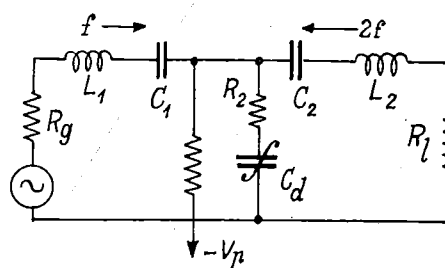


Fig. 9

Circuitos multiplicadores básicos [4]. [10]. [11].

Pueden ser:

- duplicadores (Fig. 9).
- triplicadores (Fig. 10).
- transpondedores de frecuencia.

La figura 9 muestra un esquema ideal de circuito duplicador con el diodo en paralelo. Existe la posibilidad de circuito duplicador con diodo en serie, pero aquél es más utilizado en la práctica, ya que, entre otras cosas, permite, con las debidas simplificaciones, llegar a resultados mediante el cálculo.

Supuestos los filtros perfectos, el esquema representa dos circuitos resonantes acoplados entre

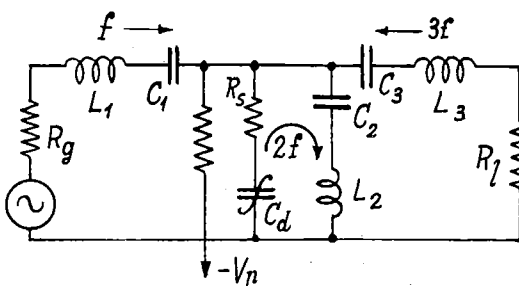


Fig. 10

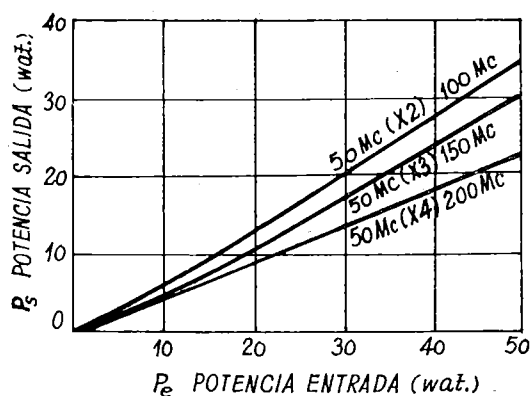


Fig. 11

sí por medio de la impedancia común que constituye el varactor. El circuito de entrada es un cortocircuito para la frecuencia fundamental del generador y una impedancia infinita para su primer armónico. La salida, en cambio, resuena a la frecuencia doble, que pasa a la carga. En bornas del diodo se producen tensiones de todos los armónicos.

El circuito triplicador necesita un «idler» o «shunt» de reposo, a través del cual se cierra el segundo armónico sin pasar al circuito de salida.

Cualquiera de estos circuitos debe, como es natural, adaptar sus impedancias a la entrada y a la salida.

El principio del circuito transponedor de frecuencia es análogo al del triplicador con «idler», con la única diferencia de que no tiene por qué existir relación armónica entre las señales.

Características potencia-frecuencia.

Para obtener armónicos superiores se emplean combinaciones de los anteriores en forma de cascada, pero ya se comprende intuitivamente que, cuanto mayor es el armónico deseado, mayor es también la pérdida de conversión. En la figura 11, correspondiente a distintos circuitos multiplicadores realizados con el MV705, y en las

figuras 12 y 13, para el mismo diodo utilizado como duplicador y triplicador, se ilustran con toda claridad los siguientes extremos:

- El rendimiento es tanto mejor cuanto que el orden de multiplicación es menor, para una misma frecuencia de entrada.
- Las pérdidas aumentan casi linealmente con la frecuencia, para una excitación constante.
- En general, el rendimiento es el mismo, independientemente del nivel de la potencia excitadora, para cada frecuencia.

Tipos de diodos [4]. [10]. [11].

La disposición de los circuitos y la forma de los diodos empleados varían de acuerdo con la frecuencia de utilización:

— Para frecuencias hasta 300 ó 400 Mc/s los circuitos son de constantes localizadas y los varactores van provistos de hilos de conexión; su apariencia exterior es la de cualquier elemento semiconductor de los que acostumbramos a manejar.

— Para frecuencias más elevadas, circuitos de tres capas. Los diodos tienen forma parecida a cartuchos.

— Para frecuencias superiores a 2.000 Mc/s los conductores son guías de onda y los diodos pequeñas píldoras (por ejemplo, altura, dos milímetros; diámetro, 3,2 milímetros).

Técnicas de fabricación y límites de los actuales varactores [4]. [10]. [11].

Estas técnicas tienden a la consecución de varactores de pequeña resistencia y elevada tensión de ruptura, lo que permite aumentar la frecuencia de corte y la potencia permisible. En orden a la potencia es preferible utilizar el silicio, que tiene una conductividad térmica excelente y alta resistencia a la temperatura en relación con otros materiales.

Los diodos son de unión difusa, cuya super-

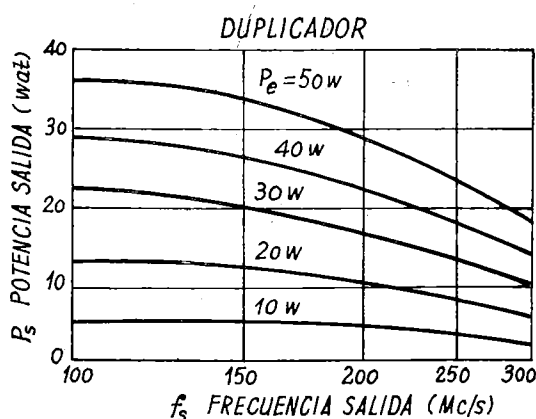


Fig. 12

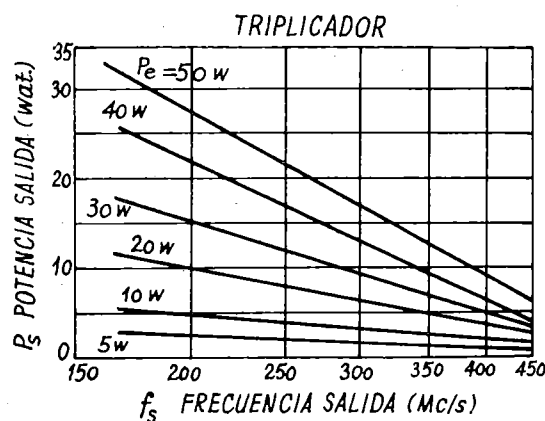


Fig. 13

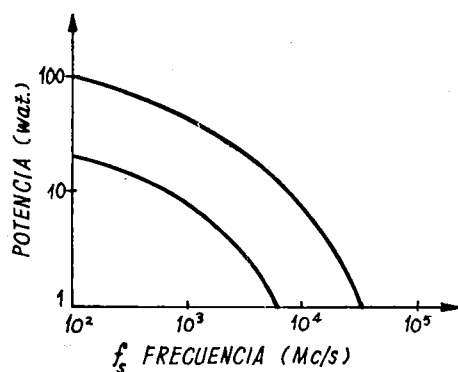


Fig. 14

ficie o sección se corta por técnicas Mesa o Planar. Esta última da una mejor definición de las superficies. En cambio, para las capacidades elevadas, la primera permite obtener más altas tensiones de ruptura.

Como se ha dicho, hay diodos que pueden admitir potencias elevadas (25, 50 vatios), pero, en realidad, la potencia viene limitada por la etapa de amplificación con transistores que precede a la línea multiplicadora.

El rendimiento por etapa multiplicadora es considerable, pero en una línea de multiplicación en cascada el rendimiento total es el producto de los rendimientos parciales y ya se ha visto cómo éstos disminuyen con el grado de conversión y con la frecuencia. De todas formas, y aun con todos los inconvenientes de sintonización, pérdidas en

filtraje, etc., el rendimiento es del mismo orden que el de los klystrons y tienen la ventaja de un menor ruido.

Las curvas de la figura 14 ilustran muy gráficamente el estado actual y las previsiones de resultados potencia-frecuencia en la producción de armónicos con varactores.

Inconvenientes [4].

A menudo, como se vio al principio, los diodos tienen característica doble (histéresis), o sea, dos posibles modos de funcionamiento para una misma excitación, y pueden producirse saltos bruscos en la señal de salida.

También es inconveniente la tendencia natural de los varactores a comportarse como amplificadores paramétricos. La energía de la señal de entrada puede causar amplificación paramétrica del ruido, de frecuencias de bajo nivel o de otras señales que se presenten en el circuito. Esto produce inestabilidad.

Por último, y debido a la propia característica del diodo, resulta dificultosa la sintonización del circuito.

Estos inconvenientes, en general, se resuelven satisfactoriamente con un diseño adecuado y la prueba es que ya se han realizado circuitos generadores de energía en microondas, pero sobre todo fuentes de bombeo compactas para amplificadores paramétricos y osciladores locales de recepción en alta frecuencia.

REFERENCIAS

- [1] *Energie á microonde á l'aide de dispositifs á semi-conducteurs*. M. M. FORTINI et J. WILMS. Colloque International sur les dispositifs á semi-conducteurs. París, 1961.
- [2] «Varicap. Condensador variable con la tensión». *L'Antenna*. 11 de noviembre de 1958.
- [3] *The Hughes silicon capacitor, a revolutionary device*. Hughes Aircraft Company. 15 de agosto de 1958.
- [4] *El diodo varactor. El demodulador Lenkurt*. Junio de 1963.
- [5] *Some general properties of nonlinear elements*. Part 1. «General energy relations». J. M. MANLEY and H. E. ROWE. *P. I. R. E.* Julio de 1956, páginas 904-913.
- [6] «Amplificazione parametrica». Dott. ELIO BRIGANTI. *Elettronica*, 1962. Número 4.
- [7] «Semiconductor-diode parametric amplifiers». BLACKWELL. KOTZEBUE. *Prentice-Hall*, 1961.
- [8] «Fundamentals of electron devices». KARL R. SPANGENBERG. *McGraw-Hill*, 1957, págs. 129-136.
- [9] «Semiconductores». ROGELIO SEGOVIA. *E. T. S. I. T.*, 1964. Capítulo VII.
- [10] «Etude des multiplicateurs de fréquence avec des diodes á capacité variable». D. J. ROULSTON et M. SCHWINDENHAMMER. *Annales de Radioélectricité*. Enero de 1964.
- [11] «Los generadores de hiperfrecuencia a semiconductores». *Télonde. Groupement E de la C. S. F.* Febrero de 1964.
- [12] «L'Onde Eléctrique». Noviembre de 1964, págs. 63 y 86 de *Noticias Técnicas*. Philco y RCA. Folleto 1963 de Semiconducteurs de Texas Instruments France.